

A NITROGÉN-MONOXID (NO) SZEREPE, REAKTÍV OXIGÉNFORMÁKKAL (ROF) ÉS AUXINNAL VALÓ KAPCSOLATA RÉZ STRESSZ SORÁN

Megyeriné Pető Andrea

Doktori (Ph. D.) értekezés tézisei

Témavezetők:

Ördögné Dr. Kolbert Zsuzsanna

Egyetemi adjunktus

Prof. Dr. Erdei László

Egyetemi tanár

Biológia Doktori Iskola

Növénybiológiai Tanszék
SZTE TTIK



2014

Szeged

Bevezetés

A növényeket a környezetükben számos stresszhatás érheti, mint például a talajban felhalmozódó nehézfémek (NF) okozta stressz. A fémek elsődleges támadási pontja a gyökér, hiszen itt találkozik a növény először a fémmel. Ezért a NF-indukált morfogenetikai válasz fenotípus elsősorban a gyökérrendszerben jelenik meg, aminek három fő tünete van: a főgyökér merisztéma sejtek osztódásának és a sejtmegegyülésnek a gátlása, valamint a periciklus sejtek redifferenciációja. Ezen sejt szintű folyamatok eredményeképpen a stressz-indukált morfogenetikai választ mutató gyökérzet főgyökere rövid, oldalgyökér száma emelkedett, gyökérszőrei pedig a csúcshoz közelebb jelennek meg. Tehát a növények képesek a nem megfelelő környezeti feltételekre a szerveik növekedésének átrendezésével reagálni, amit **stressz-indukált morfológiai válasznak** (SIMV) nevezünk.

A **réz** (Cu) egy esszenciális mikroelem a növények számára és mindemellett egy olyan redox-aktív nehézfém is, mely magasabb koncentrációban toxikus lehet, valamint SIMV-t idéz elő. A növekedési változások hátterében a hormonális homeosztázis megváltozása állhat. Az **auxin**, az egyik fő növekedésszabályozó, mely elősegíti a fejlődési folyamatokat a hajtás és gyökérrendszerben egyaránt. Ezért a különböző stressz faktorok által indukált auxin homeosztázisban bekövetkező változások szintén részben felelősek lehetnek a morfológiai változásokért. A külső (környezeti) és belső (hormonális) regulációs elemek közötti gazdag jelátviteli hálózatban szignálmolekulák teremtenek kapcsolatot az egyes komponensek között, biztosítva a fejlődési és növekedési jelek összehangolását. Más átmeneti fémekhez hasonlóan a réz kétoxidációs állapota (Cu^+ and Cu^{2+}) közötti redox ciklus katalizálja a különböző **reaktív oxigénformák** (ROF) képződését. A réz stressz során képződő ROF-knak kettős szerepük ismert, hiszen nagy mennyiségben károsak a sejtek életfolyamataira, ugyanakkor alacsony koncentrációban másodlagos hírvivőként szerepelnek az intracelluláris jelátviteli hálózatban, ezáltal közvetítve számos választ a növényi sejtekben. A **nitrogén-monoxid** (NO), a reaktív nitrogénformák (RNF) egyike, egy diffúzibilis gáz jelmolekula a növényekben, mely részt vesz a normál fejlődési folyamatokban, és szerepet játszik a biotikus és abiotikus stressz válaszokban is. Ezért a NO és reakciótermékei nem specifikus, inkább általános, multifunkcionális jelmolekuláknak tekinthetők.

Ismert tehát az auxin és a ROF-k fontos szerepe a nehézfém-indukált SIMV jelátvitelében, és mivel a NO, mint multifunkcionális szignál számos gyökérfejlődési folyamatot szabályoz és szorosan együttműködik az auxinnal és a reaktív oxigénformákkal is,

feltételezhetjük, hogy a NO, mint fejlődés szabályozó molekula szintén szerepel a Cu által kiváltott stressz indukált morfológiai válaszban. A Ph.D. munkám során ennek a hipotézisnek a tesztelésére vállalkoztam. Ezért vizsgálatainkban a NO képződésére, működésére, szerepére, kölcsönhatásaira fókuszáltunk a réz stressznek kitett *Arabidopsis* növényekben. Megvizsgáltuk, hogy milyen hatással van a réz az idő függvényében a növények hajtás és gyökérzetére, valamint ezen folyamat hátterében milyen reakciók, hormonális és jelátviteli háttérmechanizmusok lehetnek.

Célkitűzés

Kísérleteink fókuszpontjában a NO molekula állt. Vizsgáltuk képződését, szignáltranszdukciós útvonalban betöltött szerepét és más reaktív molekulákkal (ROF) való kapcsolatát réz terhelés hatására megjelenő morfológiai válasz során.

Munkánk során a következő kérdésekre kerestük a választ:

- Az idő függvényében (rövid és hosszabbtávú kísérletek) hogyan alakul a réz-indukált morfológiai válasz, hajtásra és gyökérre nézve?
- Van-e szerepe az auxinnak és a nitrogén-monoxidnak a réz-indukált morfológiai változások jelátvitelében?
- Milyen jellegű kölcsönhatás működik az auxin és a NO között réz stressz alatt?
- Milyen mechanizmusokkal magyarázhatóak a réz hatására a NO metabolizmusban bekövetkező változások?
- Milyen kapcsolat áll fenn a NO és a ROF-k között a réz tolerancia mechanizmusában, illetve hogyan vesznek részt a ROF-ok a stressz indukált morfológiai válasz kialakulásában?

Anyagok és módszerek

Felhasznált növényi anyag

- Col-0 vad típusú,
- *nia1nia2*, *nia1nia2noa1-2* NO-hiányos,
- *nox1 (cue1)* és *gsnor1-3* NO-túltermelő,
- *vtc2-1*, *vtc2-3* aszkorbinsav hiányos,
- *miox4* aszkorbinsav túltermelő *Arabidopsis thaliana* L. növényekkel dolgoztunk.
- A DR5::GUS transzgenikus lúdfű növényeket az auxin-függő génexpresszió vizsgálatához alkalmaztuk.

Alkalmazott kezelések

- 5, 25 és 50 μM réz-szulfát (CuSO_4)
- 1mM N^G -nitro-L-arginin-metilészter (L-NAME) - NOS inhibitor
- 1mM Na-wolframát - NR gátlószer
- 10 illetve 100 μM nátrium-nitroprusszid (SNP) - NO donor
- 50 ill. 100 μM 2-(4-karboxifenil)-4,4,5,5-tetrametilimidazolin-1-oxid-3-oxid (cPTIO) - NO gyökfogó
- 10 μM naftilftálsav (NPA) - poláris auxin transzport gátlószer

Alkalmazott módszerek

Morfológiai mérések: a főgyökér hossz, hipokotil hossz, a levélnyel hossz, a sziklevel átmérő és a levélszám esetén történtek. Az oldalgyökök (OGY) számolását DR5::GUS transzgenikus növényeken végeztük el, amelyekkel a **hisztokémiai festések** is történtek. **Elemanalízis:** A vad típusú (Col-0) *Arabidopsis* növények elemtartalom meghatározása (Cu, Fe, Zn, Mn, Mo, B) induktív csatolású plazma tömegspektrométer (ICP-MS) segítségével történt. **Fluoreszcens spektrofotométer:** A DAF-FM, DCF és APF fluorofórok specifikitását *in vitro* a fluoreszcens spektrofotométerrel vizsgáltuk. **Fluoreszcens mikroszkópia:** RNF és ROF molekulák detektálása: NO tartalmat DAF-FM DA segítségével, a O_2^- -t DHE-vel, a H_2O_2 -ot AR-del, ONOO $^-$ -et APF-fel, az intracelluláris ROF tartalmat $\text{H}_2\text{DCF-DA}$ -val és az életképességet FDA fluoreszcens festékekkel határoztuk meg. A főgyökér (FGY) merisztematikus (MZ), elongációs (EZ) és differenciációs zónát (DZ), valamint a szikleveleket vizsgáltuk.

Eredmények

Munkánk során, a réz által okozott növekedési válaszok hormonális (auxin) és jelátviteli (NO) komponenseit tanulmányoztuk. Elsősorban mikroszkópiás módszerekkel dolgoztunk.

Vad típusú növényeket felhasználva meghatároztuk a hajtás és gyökérrendszer mikroelem koncentrációit (Cu, Fe, Zn, Mn, Mo, B) és azok szöveti eloszlását agaron nőtt lúdfüvekben. Az eredmények alapján elmondható, hogy a csíranövények képesek felvenni és akkumulálni a táptalajban levő réz egy részét és elszállítani azt a hajtásrendszerükbe. A réz kitettség jelentősen módosítja a csíranövények mikroelem homeosztázisát és a vizsgált mikroelemek hajtás-gyökér eloszlását.

A réz kitettség gyökér- és hajtásfejlődésre gyakorolt hatásait a kezelési időtartam függvényében, 7 és 17 napos *Arabidopsis* növények felhasználásával határoztuk meg. A **rövidebb időtartamú** kísérleteinkben a legalacsonyabb (5 μM -os) rézkoncentráció kissé megnövelt sziklevel területet, hipokotil- és FGY hossznövekedést eredményezett, míg a komolyabb rézkitettség (50 μM) szignifikáns gátlást okozott a hajtás és gyökérfejlődésben az

akkumulálódott réz miatt. **Hosszabb távon** (17 nap) a réz által kiváltott erőteljes hajtásnövekedés gátlás, valamint a gyökérmegnyúlás gátlásának elmaradása figyelhető meg, mely egy akklimatizációs folyamat aktiválódását sugallja hosszabb időtartamú réz kitettség esetén. Az oldalgyökér iniciációt lehetővé tevő sejtosztódás rézkitettségre érzékenynek bizonyult. A 25 μM rézkezelte növények gyökérrendszerében a SIMV tünetei voltak láthatóak. A SIMV kialakulása függ a rézkezelés koncentrációjától és időtartamától, hiszen csak hosszabb időtartamú, közepes erősségű (25 μM) stressz váltotta ki a megjelenését.

A hormonok metabolizmusának és transzportjának megváltozása nagyon fontos szerepet játszik a NF-k által előidézett fejlődési válaszokban. Mivel a fejlődési folyamatok főleg olyan morfogének által vezéreltek, mint például az auxin, ezért vizsgáltuk *in vivo* az auxin indukálható DR5 promóter expresszióját a DR5::GUS transzgenikus *Arabidopsis*-okban. A **rövidebb időtartamú** réz kezelés esetén a kontrollhoz képest fokozottabb auxin-függő génexpressziót tapasztaltunk a csíranövények szikleveleiben és gyökerében is. **Hosszabb távon** (17 nap), a réz más környezeti stresszfaktorokhoz (pl. só, Cd) hasonlóan a DR5 expresszió csökkenését váltja ki az *Arabidopsis* levelekben.

A nitrogén-monoxid, mint az auxin jelátvitel alapvető komponense, különböző fejlődési folyamatokat szabályoz a növényekben. A **rövid távú** kísérleteink során megállapítottuk, hogy Cu hatásaként a NO szintekben is történnek változások mindkét szervben. Sziklevelekben az 5 μM Cu okozott jelentős NO akkumulációt, míg a nagyobb mértékű NF terhelés lecsökkentette az NO tartalmat. Kontroll körülmények között a NO-kapcsolt fluoreszcencia jelentős szöveti specifitást mutat a FGY-ekben, mivel sokkal magasabb NO szintek detektálhatók az EZ-ban az MZ-hez viszonyítva. A FGY EZ-ban a réz kezelés lényeges NO csökkenést okozott, míg a MZ NO tartalmát nem befolyásolta. A NO szintekben bekövetkező változások lehetséges mechanizmusait genetikai és biokémiai módszerekkel megvizsgálva azt az eredményt kaptuk, hogy a sziklevelekben az L-arginin és NR-függő bioszintetikus útvonal is felelős lehet a réz indukálta NO akkumulációért.

A gyökér megnyúlási zónájának NO tartalom csökkenése kapcsán azt feltételeztük, hogy a Cu-indukált O_2^- eliminálja a NO-t a peroxinitrit képződését eredményező reakción keresztül. Eredményeink viszont nem támasztják alá ezt a hipotézis. A réz-indukált NO szint csökkenés háttérmechanizmusa feltehetően egyik vagy mindkét NO bioszintetikus útvonal (L-arginin-és/vagy nitrát függő) alulszabályozottsága lehet. A **hosszabb időtartamú** Cu kitettség (17 napig tartó), jelentős növekedést eredményezett a NO tartalmat tekintve. A NF terhelés

koncentrációja mellett a kezelés időtartama is befolyásolja annak NO képződésre gyakorolt hatását.

Gyökerekben a NO fő enzimatis forrása a NR, és ez az enzim termeli a NO-t stressz körülmények között. Emiatt megvizsgáltuk genetikai módszert felhasználva ezen enzim lehetséges részvételét a réz-indukált NO felszabadulás kapcsán. A vad típussal ellentétben a NR-deficiens dupla mutáns, *nia1nia2* FGY-ében nem figyelhettük meg a réz okozta NO produkciót, ami a NR réz-indukált NO szintézisben betöltött alapvető szerepére utal.

További kísérleteinkkel célunk volt feltárni a hormonális (auxin) és szignalizációs komponensek (NO) közötti kapcsolatot a réz-indukált morfológiai válaszok jelátvitelében. **Rövid távú** kísérleteinkben elsőként az auxin NO szintekre gyakorolt hatását tanulmányoztuk NPA alkalmazásával a réz kezelése mellett és mindkét szervben kimutattuk a NO szinteket. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy az auxin transzport szükséges az 5 μ M réz által kiváltott NO akkumulációhoz sziklevekben, vagyis az auxin pozitívan szabályozza az NO szintézisét enyhe rézkitettséggel. Ellenben a magasabb Cu koncentrációk esetében az auxin hiánya okozott NO szint növekedést. Azok a növények, amelyekben a NPA lecsökkentette az auxin szintet, szignifikánsan magasabb NO fluoreszcenciát mutattak a gyökérben, összehasonlítva azokkal a növényekkel, amelyeket csak rézzel kezeltünk. Ez azt sugallja, hogy az auxin negatívan szabályozza a NO szintet a FGY-ben. Kísérleti rendszerünkben a külsőleg hozzáadott indol-3-ecetsav (10^{-6} M) nem váltott ki NO képződést sem a sziklevekben sem a FGY-kben. A NO auxin-függő génexpresszióra gyakorolt hatását biokémiai úton is megvizsgáltuk. Amikor az endogén NO szinteket donor alkalmazásával növeltük, az auxin-érzékeny génexpresszió jelentősen lecsökkent a sziklevekben és a FGY-k csúcsaiban egyaránt. Ez a réz-indukált morfológiai változások hormonális (auxin) és jelátviteli komponensei (NO) között fennálló gátló kapcsolatot feltételez. Ezen eredményeket genetikai vizsgálatokkal is alátámasztottuk, melyek során a Cu által okozott növekedési választ hasonlítottuk össze vad típusú, NO-túltermelő (*nox1*) és NO hiányos (*nia1nia2* és *nia1nia2noa1-2*) csíranövényekben. A NO többlet esetén kisebb sziklevél méretek figyelhetők meg, a NO hiányos mutánsok pedig kissé nagyobb sziklevekkel rendelkeznek a vad típushoz képest. Ráadásul a sziklevél méretének csökkenése NO többlet esetén kifejezett. Ellentétben ezzel, a hipokotil sejtek megnyúlása a NO hiányos mutánsokban nagyobb érzékenységet mutatott a vad típushoz képest, míg *nox1*-ben nem volt rézre adott morfológiai válasz. Azonban a *nox1* rövidebb hipokotillal rendelkezik, mint a vad típus. A FGY elongációt tekintve a mutánsok viselkedése nem

egyértelmű. Kontroll feltételek mellett a NO-túltermelő és NO-hiányos növények FGY hossza rövidebb, mint a vad típusúaké. A rézkezelés nem okozott FGY rövidülést a *nox1* és a *nia1nia2noa1-2* mutánsban, habár egy erőteljes csökkenést eredményezett a NO-hiányos dupla mutáns FGY hosszában. A rézre adott különböző gyökér növekedési válaszok a NO-deficiens vonalak esetén azzal a hipotézissel magyarázhatóak, hogy egy kontrollhoz közeli NO státusz szükséges a gyökér architektúra szabályzásához. A NO tartalom optimális szinttől való eltérése a réz által előidézett gyökér morfológiai válasz gátlását eredményezi.

A további kísérleteink során a megváltozott NO anyagcserével rendelkező mutáns csíranövények (*nox1*, *gsnor1-3* és *nia1nia2*) réz toleranciáját tanulmányoztuk. Ezek a növények kisebb hajtás és gyökér méreteket valamint friss tömeget (FT) mutattak a vad típushoz képest, ami egy optimális NO szint szükségességét feltételezi a megfelelő növekedéshez. A *vtc2-3* és *miox4* növények vad típus-szerű hajtás és gyökér méreteket mutattak kontroll feltételek mellett. Tehát a módosított aszkorbát tartalmak és az ebből következő enyhén megváltozott ROF szintek nem befolyásolják jelentős mértékben az *Arabidopsis*-ok korai fejlődését. Az általunk alkalmazott legalacsonyabb CuSO₄ koncentráció (5 µM) csak enyhe réz tartalombeli növekedést eredményezett (~80 µg g⁻¹ SZT), és nem bizonyult toxikusnak a Col-0 csíranövények számára. Sőt, az 5 µM réz kezelésnek enyhe növekedésserkentő hatása volt (a FT-k nem-szignifikáns növekedése), bár ehhez a hatáshoz a növényekben megemelkedett NO és ROF szintek voltak szükségesek. A NO hiányos növények esetén a réznek erőteljesebb növekedést gátló hatását figyeltük meg vad típushoz képest, mely a NO növekedés fenntartása során játszott szerepét tükrözi abiotikus stressz körülmények között.

Ezt követően megvizsgáltuk a gyökér MZ sejtjeinek életképességét, amiből a réz toleranciára következtettünk. Enyhe stressz során a magas NO szintek fokozták az érzékenységet, míg nagyobb réz koncentrációk esetén a toleranciát segítették elő. Ez azt jelenti, hogy a NO szignalizációs szerepe függ a stressz erősségétől. Kismértékű rézkitettség során a *nox1* növényekben a NO életképességre gyakorolt negatív hatása visszafordítható a magas NO tartalom eliminálásával. A *vtc2-1* és *vtc2-3* lúdfüvek esetén a sejtéletképesség lecsökkent a rézkitettség hatására, viszont a *miox4* gyökerek sejtjei életképesebbnek bizonyultak. Ezek alapján feltételezhető, hogy a csökkent aszkorbát tartalom következtében kialakult magasabb ROF szint rézérzékenységhez vezet, míg az aszkorbinsav túltermelés eredményeképp létrejött kisebb ROF tartalom a réz toleranciának kedvez. A magasabb ROF

szintek megzavarják a sejt redox állapotát, mely oxidatív károsodáshoz vezet. Ez valószínűsíthetően fokozza a réz érzékenységet.

Biokémiai kísérleteket végeztünk annak igazolására, hogy a NO részt vesz-e a réztolerancia kialakításában. Ezek során a növények NO szintjét exogén NO donor (SNP) és NO gyökfogó (cPTIO) alkalmazásával módosítottuk, és detektáltuk a vad típusú és NO mutáns növények életképességét a gyökér MZ-ban. Az eredmények alapján elmondható, hogy a NO javítja a réz okozta sejtkárosodásokat erős réz stressz esetén, mivel a NO-kezelt Col-0 növények jobb életképességet mutattak. A NO túltermelő mutáns nagyfokú réztűrése és a *nia1nia2 Arabidopsis* fokozott érzékenysége szintén alátámasztja a NO stresszt enyhítő hatását. A réztűrés kialakulásához szigorúan szabályozott NO balansz szükséges, mivel az optimális szintnél kisebb vagy annál nagyobb NO tartalom sejtkárosodást idézhet elő.

Ezt követően a lehetséges kapcsolatot vizsgáltuk a NO és a ROF-k között réz stressz alatt mikroszkópos módszerrel. Magasabb NO szinthez csökkent $O_2^{\cdot-}$ szint társult a kontroll állapotú *Arabidopsis* gyökércsúcsokban, és ez fordítva is igaznak bizonyult, vagyis a csökkent NO tartalmat mutató *nia1nia2* MZ-ban a vad típusnál magasabb $O_2^{\cdot-}$ szint volt mérhető. Ez arra utal, hogy stressz mentes körülmények között a NO képes negatívan szabályozni a $O_2^{\cdot-}$ szintjét, feltehetően a ONOO⁻ képződéséhez vezető kémiai reakció által vagy az antioxidánsok, mint például a szuperoxid dizmutáz (SOD) aktivitásának módosításán keresztül. A Cu hatásaként a H_2O_2 szintek lecsökkentek NO többlet jelenlétében, ami alapján azt feltételezhetjük, hogy a megemelkedett NO szint hatására az antioxidáns gének (pl. glutation peroxidáz vagy a glutation transzferáz) expressziója fokozódott, így valószínűleg ROF detoxifikáció történt. Továbbá, a NO hiány esetében, a $O_2^{\cdot-}$ szint csökkenése H_2O_2 képződéssel járt együtt, ami lehetséges SOD-függő detoxifikációt feltételez. A megváltozott aszkorbát metabolizmus és ennél fogva a megváltozott ROF tartalom (a *vtc2-1*, *vtc2-3* és *miox4* mutánsok) a Col-0-nál alacsonyabb NO szintet eredményez, mely arra utal, hogy a ROF-k szigorúan szabályozott szintje hat a NO metabolizmusra stressz mentes körülmények között. A réz-indukált, nem szignifikáns változásokat figyelembe véve a ROF-k hatása a NO metabolizmusra réz stressz alatt elhanyagolhatónak mondható.

Munkánk során kapott eredményeinkből a következő főbb következtetések vonhatók le:

- A réz-indukált morfológiai válasz megjelenése az *Arabidopsis* növényekben függ a fémterhelés időtartamától és koncentrációjától. Hosszú távon az *Arabidopsis* réz stressz által kiváltott fejlődési indukciót (OGY szám gyarapodást) mutat.
- A rövid és a hosszabb időtartamú réz terhelés egyaránt megváltoztatja az auxin és a NO metabolizmusát. Rövid távon a réz többlet auxin szint növekedést, ugyanakkor NO szint csökkenést okoz a csíranövények gyökerében, míg hosszabb távon ezekkel ellentétes irányú változások történnek.
- A réz-indukált SIMV szignál transzdukciójában szereplő hormonális- és jelkomponens, azaz az auxin és a NO között kölcsönösen negatív kapcsolat áll fenn.
- Sziklevelekben a réz-indukált NO akkumulációért mindkét feltételezett enzimátikus NO bioszintézis útvonal (L-arginin- és NR-függő) felelős, míg a NO csökkenés a FGY-ben a peroxinitritről és szuperoxid gyökánion képződésétől függetlenül történik. Hosszabb távon a rézkezelt gyökerekben bekövetkező NO szintézisért a NR enzim aktivitása a felelős.
- A NO részt vesz a tolerancia kialakításában nagyobb mértékű réz terhelés esetén, azáltal, hogy szabályozza a szuperoxid gyökánion és a H₂O₂ réz stressz során történő képződését. A NO-dal ellentétben a ROF-k fokozzák a réz érzékenységet az *Arabidopsis* csíranövényekben.

Publikációs lista

(*A csillaggal jelölt közlemények közvetlenül kapcsolódnak a PhD értekezéshez)

1. ***Pető Andrea**, Lehotai Nóra, Jorge Lozano-Juste, José León, Tari Irma, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna. Involvement of nitric oxide (NO) in signal transduction of copper-induced morphological responses in *Arabidopsis* seedlings *Annals of Botany* 108:449-457, 2011
IF: 4.030
2. *Kolbert Zsuzsanna, **Pető Andrea**, Lehotai Nóra, Feigl Gábor, Ördög Attila, Erdei László In vivo and in vitro study of fluorophore- specificity *Acta Biologica Szegediensis* p37-41 Vol 56, Number 1, 2012
3. *Kolbert Zsuzsanna, **Pető Andrea**, Lehotai Nóra, Feigl Gábor, Erdei László Long-term copper (Cu²⁺) exposure impacts on auxin, nitric oxide (NO) metabolism and morphology of *Arabidopsis thaliana* L. *Plant Growth Regulation* 2012
IF: 1.670
4. ***Pető Andrea**, Lehotai Nóra, Feigl Gábor, Tugyi Nóra, Ördög Attila, Gémes Katalin, Tari Irma, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna Nitric oxide contributes to copper tolerance by influencing ROS metabolism in *Arabidopsis* *Plant Cell Reports* 2013
IF: 2.509

5. Lehotai Nóra, **Pető Andrea**, Kolbert Zsuzsanna, Erdei László. *In vivo* and *in situ* visualization of early signaling events induced by heavy metals in pea root meristem *Acta Physiologiae Plantarum* 33:(6) pp. 2199-2207. 2011 **IF: 1.639**
6. Szöllősi Réka, Kálmán Erika, Medvegy Anna, **Pető Andrea**, Varga Sz. Ilona Studies on oxidative stress caused by Cu and Zn excess in germinating seeds of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) *Acta Biologica Szegediensis* p175-178 Vol 55, Number 1, 2011
7. Szepesi Ágnes, Gémes Katalin, Orosz Gábor, **Pető Andrea**, Takács Zoltán, Vorák Mária, Tari Irma Interaction between salicylic acid and polyamines and their possible roles in tomato hardening processes *Acta Biologica Szegediensis* p165-166 Vol 55, Number 1, 2011
8. Lehotai Nóra, **Pető Andrea**, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna The effect of selenium (Se) on development and nitric oxide levels in *Arabidopsis thaliana* seedlings *Acta Biologica Szegediensis* p105-107 Vol 55, Number 1, 2011
9. Kolbert Zsuzsanna, **Pető Andrea**, Szöllősi Réka, Erdei László, Tari Irma Nitric oxide (NO) generation during vegetative/generative transition of the apical meristem in wheat *Acta Biologica Szegediensis* p95-97 Vol 55, Number 1, 2011
10. Lehotai Nóra, Kolbert Zsuzsanna, **Pető Andrea**, Feigl Gábor, Ördög Attila, Devanand Kumar, Tari Irma, Erdei László Selenite-Induced Hormonal and Signalling Mechanisms during Root Growth of *Arabidopsis thaliana* L. *J. Exp. Bot.* 2012 **IF: 5.242**

Konferencia előadások és poszterek

1. **Pető Andrea** Réz indukált hajtás- és gyökérmorfológiai válaszok vizsgálata lúdfű növényekben Magyar Növénybiológiai Társaság Fiatal Növénybiológusok előadássorozata, 2011. január 17. Szeged SZBK
2. **Pető Andrea** A reaktív oxigén- és nitrogénformák, valamint az auxin kapcsolatának vizsgálata lúdfű növényeken rézkezelés hatására Szegedi Biológus Doktorandusz Konferencia Szeged, 2012. május 21-22.
3. **Pető Andrea** A nitrogén-monoxid (NO) réz stressz során játszott szerepe és a reaktív oxigénformákkal (ROF) való kapcsolata Magyar Növénybiológiai Társaság Fiatal Növénybiológusok Előadássorozata 2013. január 25. Szeged SZBK
4. **Pető Andrea**, Farsang Andrea, Erdei László Biológiai indikátorok a városi szennyezettség vizsgálatában: A *Taraxacum officinale* Weber ex Wiggers levelének nehézfém-tartalom vizsgálata Szegeden 8. Magyar Ökológus Kongresszus (MOK) 2009. augusztus 26-28, Szeged, Hungary p181
5. Kolbert Zsuzsanna, **Pető Andrea**, Erdei László. *In vivo* imaging of reactive oxygen (ROS) and nitrogen species (RNS) during copper-induced root morphological responses in *Arabidopsis*. 3rd International Plant NO Club, 15-16 July, 2010. Olmütz, Csehország p33
6. **Pető Andrea**, Lehotai Nóra, Erdei László, Kolbert Zsuzsanna Metal content and nitric oxide (NO) production in the roots of heavy metal-treated pea plants. 11th International Symposium Interdisciplinary Regional Research (ISIRR), 13-15 October, 2010 Szeged, Hungary p105